

## **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИЛОВЫХ МОДУЛЕЙ ФИРМЫ “MITSUBISHI” В ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

*Рассмотрено применение силовых IGBT модулей Mitsubishi в преобразователе частоты для асинхронного двигателя. Рассмотрен алгоритм управления силовыми ключами, приведен исходный текст фрагмента программы управления для однокристального микроконтроллера, приведена упрощенная принципиальная схема.*

Частотно-регулируемый электропривод приобретает все большее распространение в промышленности и бытовой технике. Преимущества такого привода очевидны: улучшенное использование мощности двигателя, возможность замены двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей с фазным ротором на асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, следствием чего является общее повышение надежности системы за счет устранения щеточно-коллекторных узлов. Основным недостатком же частотного привода является высокая стоимость силового преобразователя частоты, порядка \$100-\$300 за 1 кВт выходной мощности [1].

Фирмой Mitsubishi выпускается ряд интеллектуальных силовых модулей (IPM – intelligent power module) для реализации на их основе преобразователей частоты с максимальной мощностью от 100 Вт до 3,7 кВт. Основное достоинство этих модулей – низкая цена и высокая степень интеграции, позволяющая создавать надежные и функционально насыщенные устройства радиолюбителям средней квалификации, имеющим опыт работы с однокристальными микроконтроллерами. Применение микроконтроллера позволяет при минимальных схемотехнических затратах получить максимальное разнообразие функциональных возможностей, ограничиваемое только фантазией и способностями разработчика. Типовыми применениями интеллектуальных силовых модулей являются: работа в кондиционерах, холодильниках, стиральных машинах и пр. бытовых и промышленных устройствах, в которых используются двигатели малой мощности. Возможна работа преобразователя частоты в генераторном режиме, например, в ветрогенераторе. Эксперименты по использованию асинхронного двигателя в генераторном режиме подтвердили это.

Целью работы является создание частотного преобразователя на основе силового интеллектуального модуля PS21563 мощностью 400 Вт [2,3]. На рис. 1 приведена структурная схема модуля и его “обвязка”.

Для формирования выходного напряжения применена широтно-импульсная модуляция (ШИМ) с несущей частотой 3,9 кГц. Для обеспечения постоянного критического момента двигателя независимо от частоты применен закон управления  $V/f=\text{const}$  [4,5].

Таким образом, при изменении выходной частоты соответствующим образом изменяется и выходное напряжение преобразователя. Преобразователь формирует трехфазную систему напряжений с переменной амплитудой и частотой. Формирование напряжений на двигателе производится путем управления тремя полумостовыми выходными узлами схемы (см. рис. 1). Выводы средних точек полумостов – U,V,W – выход преобразователя. Выводы Р и N – напряжение питания, которое для PS21563 рекомендовано 300 В (это объясняется тем, что в Японии, Америке и Австралии напряжение сети 115В (фазное), что при трехфазном выпрямлении позволяет получить 300В). Для применения в Украине достаточно применить однофазное выпрямление напряжения сети, а при мощности более 200 Вт рекомендуется

<sup>1</sup> ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

<sup>2</sup> ПГТУ, студент

использовать активный корректор коэффициента мощности, что позволит избежать создания помех в сети и стабилизировать напряжение питания силовой части.

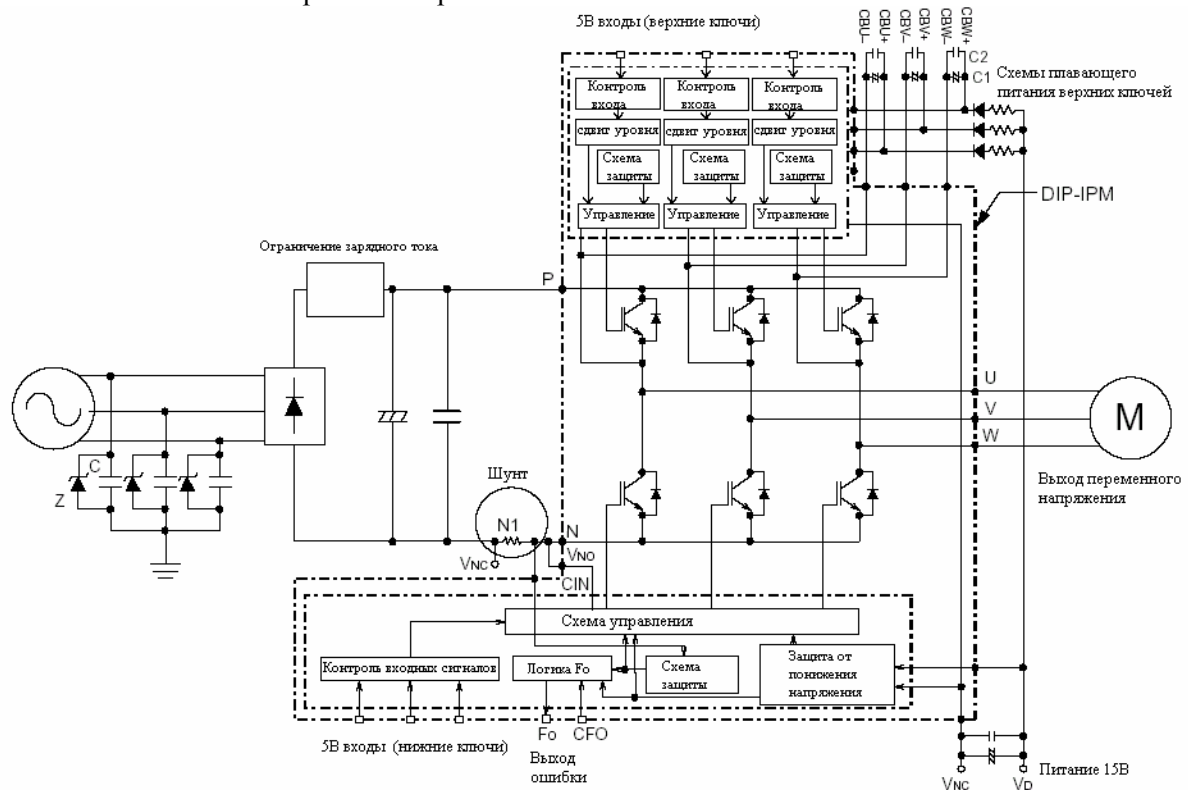


Рис. 1 - Структура частотного преобразователя на базе интеллектуального силового модуля PS21563

Рассмотрим принцип формирования выходных сигналов. Для последовательности прямоугольных импульсов с периодом  $T$  и скважностью  $D$  (рис.2) среднее значение напряжения будет

$$U = U_m * D \quad (1)$$

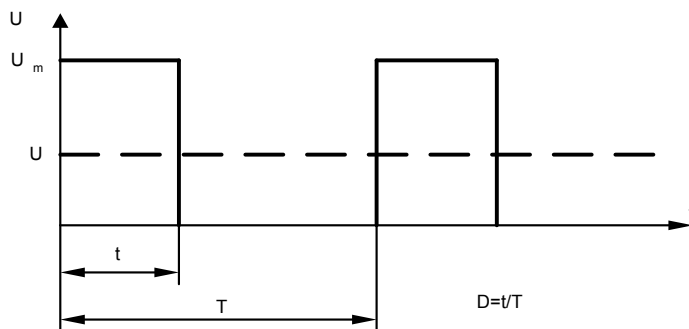


Рис. 2 – Пояснение принципа широтно-импульсной модуляции

Здесь:

$U_m$  – напряжение питания силовой части (выпрямленное и сглаженное напряжение сети),  
 $D$  – скважность.

Изменяя скважность от 0 до 1 можно изменять выходное напряжение от 0 до  $U_m$ .

Как известно, трехфазную симметричную систему напряжений можно представить в виде:

$$U_a = U_m * \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$U_b = U_m * \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (3)$$

$$U_c = U_m * \sin(\omega t + 120^\circ), \quad (4)$$

где  $U_a, U_b, U_c$  – фазные напряжения,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота,  $t$  – время.

Сопоставляя (1) с (2)...(4) можно заметить, что, заменив в (1)  $D$  на  $\sin(\omega t)$ , можно получить (2), заменив в (1)  $D$  на  $\sin(\omega t - 120^\circ)$ , можно получить (3) и так далее.

Однако, функция  $\sin(\omega t)$  может принимать отрицательные значения, что приводит к неоднозначности при вычислении скважности импульсов. Выход из этого положения возможен за счет преобразования фазных напряжений таким образом, чтобы симметрия линейных (междуфазных) напряжений сохранилась, а сами фазные напряжения лежали в диапазоне  $(0 \dots U_m)$ . Тогда выражения (1), (2), (3) примут вид:

$$U_a = U_m * \frac{1}{2} * (1 + \sin(\omega t)) \quad (5)$$

$$U_b = U_m * \frac{1}{2} * (1 + \sin(\omega t - 120^\circ)) \quad (6)$$

$$U_c = U_m * \frac{1}{2} * (1 + \sin(\omega t + 120^\circ)) \quad (7)$$

Здесь фазные напряжения разделены на 2 и к ним добавлена постоянная составляющая  $\frac{1}{2} * U_m$ . Постоянная составляющая на линейные напряжения не влияет, а амплитуда линейных напряжений составит  $\sqrt{3}/2 * U_m$ , т.е.  $0.866 U_m$ . Путем подобных ухищрений возможно довести амплитуду выходного напряжения до  $U_m$ .

Сопоставляя выражения (5), (6), (7) с (1), получаем скважность выходных импульсов каждого из трех полумостов:

$$D_a = \frac{1}{2} * (1 + \sin(\omega t)) \quad (8)$$

$$D_b = \frac{1}{2} * (1 + \sin(\omega t - 120^\circ)) \quad (9)$$

$$D_c = \frac{1}{2} * (1 + \sin(\omega t + 120^\circ)), \quad (10)$$

где  $D_a, D_b, D_c$  – скважности выходных импульсов полумостов фаз А, В и С соответственно.

Для изменения (уменьшения) амплитуды выходного напряжения достаточно умножить три значения скважности на коэффициент от 0 до 1. Фильтрации выходных напряжений не производится, так как индуктивность рассеяния статора двигателя служит демпфером выходного тока. Поэтому, несмотря на то, что напряжения на двигателе имеют вид прямоугольных импульсов с переменной скважностью, форма токов двигателя близка к синусоиде.

Рассмотрим аспекты практической реализации преобразователя частоты.

Основу силовой части представляет микросхема PS21563 – интеллектуальный силовой модуль с выходной мощностью до 400 Вт. В ее состав входят:

- 6 IGBT транзисторов с обратными быстродействующими диодами;
- схемы управления затворами нижних IGBT с защитой от короткого замыкания;
- схемы защиты от недостаточного напряжения для нижних и верхних плеч;
- встроенные схемы управления затворами верхних IGBT с потенциальной развязкой;
- схема предотвращения сквозных токов

Управление силовым модулем осуществляет однокристалльный микроконтроллер Attiny26L фирмы ATMEL, работающий на частоте 8 МГц от внутреннего калиброванного RC генератора [6].

Программа управления написана на языке Си с использованием компилятора IAR C v2.28 фирмы IAR Systems [7]. В программе реализован плавный разгон двигателя путем плавного повышения частоты от 3 до 50 Гц. Для хорошего понимания работы исходного текста необходимы начальные знания синтаксиса языка C, а также представление о периферийных устройствах контроллера AtTiny26.

Рассмотрим подробнее работу программы.

```
//Компилятор – IAR C v2.28
```

```
#include <iotiny26.h>
```

```
#include <inavr.h>
```

```
//Определение констант для наглядности
```

```
#define up_A PORTA_Bit0
```

```
#define up_B PORTA_Bit1
```

```
#define up_C PORTA_Bit2
```

```
#define lw_A PORTA_Bit3
```

```
#define lw_B PORTA_Bit4
```

```
#define lw_C PORTA_Bit5
```

```
#define OFF() PORTA=0
```

```
#define up_ON() PORTA=7
```

```
#define dt() __delay_cycles(32)
```

```
#define FAULT (!PINA_Bit6)
```

```
#define FAULT_LED PORTB_Bit0
```

```
//Подключение библиотек для AtTiny26
```

```
//Подключение библиотек для встроенных функций
```

```
//Верхний ключ фазы А – вывод PA0
```

```
//Верхний ключ фазы В – вывод PA1
```

```
//Верхний ключ фазы С – вывод PA2
```

```
//Нижний ключ фазы А – вывод PA3
```

```
//Нижний ключ фазы В – вывод PA4
```

```
//Нижний ключ фазы С – вывод PA5
```

```
//Выключение всех ключей
```

```
//Включение верхних ключей и выключение нижних
```

```
//Задержка 4мкс – для бестоковой паузы
```

```
//Вход сигнала аварии – PA6
```

```
//Выход индикации аварии
```

```

#define START (!PINB_Bit3) //Вход для кнопки ПУСК
#define STOP (!PINB_Bit6) //Вход для кнопки СТОП
//Определение переменных
__no_init unsigned char tab[96]; //Таблица скважностей
__regvar __no_init unsigned ia@12,ib@10,ic@8; //индексы таблицы
__regvar __no_init unsigned di@14; //приращение индексов
__regvar __no_init unsigned char ta@7,tb@6,tc@5,acnt@4; //временные переменные
extern __flash unsigned char sinetab[]; //Таблица синусов (96 значений)
//Функция, выполняющая подготовку таблицы tab[] и расчета переменной di
void newf(unsigned f){ // f – устанавливаемая выходная частота
    unsigned char t;
    di=961*256*f/3906; //96*256 – полный период, 3906 Гц – частота ШИМ
    f=(f<8)/50; //Реализуется закон U/f=const.
    for(t=0;t<96;t++)tab[t]=(f*sinetab[t])>>8;
}
// Основная часть программы
void main(void){
    char f; unsigned char tc1; //Временные переменные
    OSCCAL=(char __flash*)0x7FF; //Калибровка встроенного RC генератора
    ACSR=128; //Выключение аналогового компаратора
    PORTA=0;
    DDRA=63;
    PORTB=0;
    DDRB=0x01; //PB0 выход
    TCCR0=8+2; //сброс делителя таймера 0 и установка коэфф. деления 8
    while(FAULT); //ожидание установления напряжения 15 В.
    goto stop; //переход на метку stop
restart: //запуск двигателя
    WDTCSR=8; //разрешение сторожевого таймера с временем 17мс
    ia=0;ib=64*256;ic=32*256; //начальные индексы (A=0°,B=-120°,C=+120°)
    newf(f=3);acnt=0; //начинаем с частоты 3 Гц.
newPWMT: // новый период ШИМ
    TCNT0=0; //сброс таймера
    if(ta=tab[ia>>8])up_A=1;else lw_A=1; //чтение индексов из tab[] и, если
    if(tb=tab[ib>>8])up_B=1;else lw_B=1; //скважность не равна 0, включаем
    if(tc=tab[ic>>8])up_C=1;else lw_C=1; //верхние ключи, иначе – нижние.
PWMloop:
    tc1=TCNT0; //чтение таймера
    if(up_A && tc1>ta){up_A=0;dt();lw_A=1;} //если время, прошедшее с момента
    if(up_B && tc1>tb){up_B=0;dt();lw_B=1;} //сброса таймера, больше необходимого,
    if(up_C && tc1>tc){up_C=0;dt();lw_C=1;} //производится переключение ключей.
    if(!TIFR_Bit1)goto PWMloop; //если таймер не переполнен, переход на PWMloop
    TIFR_Bit1=1;OFF(); //сброс флага переполнения и выключение всех ключей
    if(FAULT)goto HWfault; //если произошла аппаратная авария – выход на HWfault
    if(STOP)goto stop; //если нажата кнопка STOP
    ia+=di;ib+=di;ic+=di; //увеличение индексов
    if(ia>=96*256)ia=96*256; //если индекс вышел за пределы
    if(ib>=96*256)ib=96*256; //таблицы – возврат к началу таблицы
    if(ic>=96*256)ic=96*256;
    __watchdog_reset(); //сброс сторожевого таймера
    if(f>=50 || ++acnt<254)goto newPWMT; //определение необходимости разгона
    acnt=0; //сброс счетчика времени разгона
    newf(f++); //увеличение выходной частоты
    goto newPWMT; //переход на формирование ШИМ
stop:
    WDTCSR=16+8;WDTCSR=0; //выключение сторожевого таймера
stop_1:
    tc1=0;
stop_2:
    if(START)if(++tc1)goto restart; //ожидание нажатия START с защитой от дребезга
    else goto stop_2;
    goto stop_1;
HWfault:
    WDTCSR=16+8;WDTCSR=0; //аппаратная авария
    //выключение сторожевого таймера

```

```

    FAULT_LED=1;__delay_cycles(320000);    //мигание светодиода
    FAULT_LED=0;__delay_cycles(320000);
    if(!STOP)goto HWfault;                //пока не нажата кнопка STOP
    goto stop;                             //конец функции main()
}

```

Таблица синусов sinetab[]:

```

__flash unsigned char sinetab[96]={
128,136,144,152,160,168,176,184,191,198,205,211,217,223,228,233,237,
241,245,248,250,252,253,254,255,254,253,252,250,248,245,241,237,233,
228,223,217,211,205,198,191,184,176,168,160,152,144,136,128,119,111,
103,95,87,79,71,64,57,50,44,38,32,27,22,18,14,10,7,5,3,2,1,1,1,2,3,5,
7,10,14,18,22,27,32,38,44,50,57,64,71,79,87,95,103,111,119
};

```

Программа написана лишь для демонстрационных целей. Возможно добавление функции регулировки скорости, изменение зависимости выходного напряжения от частоты, увеличение глубины модуляции со 100 % до 115 %, связь с ПК. Дальнейшие усовершенствования могут заключаться в следующем:

- введение режима динамического торможения
- введение режима генераторного торможения с гашением энергии на тормозном резисторе
- измерение мгновенных значений фазных токов двигателя
- измерение параметров схемы замещения двигателя
- стабилизация скорости без использования датчика скорости при медленно меняющейся нагрузке ( скалярное управление двигателем )
- введение режима рекуперативного торможения с отдачей энергии в сеть
- управление скоростью и моментом при произвольной нагрузке (учет влияния электромагнитных и электромеханических переходных процессов в приводе – векторное управление двигателем)

### *Выводы*

Приведена упрощенная программа управления для микроконтроллера с комментариями, поясняющими принцип работы. Предложенная программа позволяет реализовать управление частотой вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Закон управления обеспечивает постоянство критического момента двигателя независимо от частоты, за исключением области очень низких частот. Управление двигателем скалярное, что позволяет подключить к выходу преобразователя частоты несколько машин. Эти возможности в сочетании с низкой ценой позволяют создать простой и надежный преобразователь частоты, который может быть использован, например, в лабораторных целях для демонстрации частотного управления асинхронными машинами.

### *Перечень ссылок*

1. <http://www.ab.com>
2. <http://www.mitsubishichips.com/Global/common/cfm/eProfile.cfm?FOLDER=/product/power/powermod/dipim/dipimv3>
3. [http://www.mitsubishichips.com/Global/common/cfm/ePartProfile.cfm?FILENAME=ps21563\\_e.pdf](http://www.mitsubishichips.com/Global/common/cfm/ePartProfile.cfm?FILENAME=ps21563_e.pdf)
4. *Притужалов В.Я.* Электрические машины: Учеб. пособ. /В.Я. Притужалов. – Мариуполь: ПГТУ, 2002. – 250с.
5. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. /Л.А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2002. – 638с.
6. [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc1477.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc1477.pdf)
7. <http://www.iar.com>

Статья поступила 31.01.2005